

УДК 550.38

## НАПРЯЖЁННОСТЬ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ В РАННЕМ МЕЛУ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗУЧЕНИЯ ТРАППОВ АРХИПЕЛАГА ЗЕМЛЯ ФРАНЦА-ИОСИФА

© 2024 г. В. В. Абашев<sup>1,2,\*</sup>, член-корреспондент РАН Д. В. Метелкин<sup>2,1</sup>, А. А. Елисеев<sup>2,1</sup>,  
академик РАН В. А. Верниковский<sup>1,2</sup>, Н. Э. Михальцов<sup>1,2</sup>, Е. В. Виноградов<sup>2,1</sup>

Поступило 21.05.2024 г.

После доработки 08.07.2024 г.

Принято к публикации 09.07.2024 г.

Приводятся сведения об абсолютной величине напряжённости магнитного поля Земли в начале мелового суперхрона C34n, полученные по базальтам о. Гукера архипелага Земля Франца-Иосифа (ЗФИ), которые рассматриваются в качестве одного из проявлений крупной изверженной провинции Высокоширотной Арктики. Хорошая сохранность информации о древнем геомагнитном поле в изученных базальтах обусловлена наличием псевдооднородных зёрен первично-магматического титаномагнетита. Полученные определения палеонапряжённости методом Телье-Коэ, с учётом других необходимых обоснований, удовлетворяют общепринятым критериям надёжности и свидетельствуют, что интенсивность магнитного поля Земли 125 млн лет назад, в момент формирования траппов архипелага ЗФИ, была в 4 раза ниже современной. Согласно нашим оценкам, среднее значение виртуального дипольного момента составляет  $1.7 \times 10^{22} \text{ А} \cdot \text{м}^2$ . Новые определения поддерживают представления о низкой величине палеонапряжённости на рубеже баррема–апта, наличии корреляционной связи между напряжённостью геомагнитного поля, частотой инверсий и формированием мантийных плюмов.

**Ключевые слова:** палеомагнетизм, палеонапряжённость, меловой суперхрон C34n, метод Телье-Коэ, траппы, архипелаг Земля Франца-Иосифа, крупные изверженные провинции

**DOI:** 10.31857/S2686739724110016

На протяжении геологической истории магнитное поле испытывало многократные инверсии. Согласно данным мировой шкалы магнитной полярности (GPTS), за последние 170 млн лет продолжительность большинства магнитохронов составляет от 0.1 до 1 млн лет. Исключением является только длительный меловой, от апта до сантона (84–121 млн лет) суперхрон (обозначаемый CNS, Джалал или C34n), когда в течение ~ 40 млн лет, магнитное поле Земли характеризуется прямой полярностью, при практически полном отсутствии инверсий. Согласно теоретическим моделям ([1–4] и др.), такой продолжительный интервал времени стабильного

состояния геомагнитного поля отражает перестройку глубинных термодинамических процессов, в том числе во внешнем жидком ядре, которые вызваны отводом накопленного избыточного тепла плюмами, возникающими на границе ядро–мантия, и/или активизацией конвективных течений в мантии. Соответственно интервалы суперхронов должны отличаться преобладающей высокой напряжённостью геомагнитного поля. Это, в целом, подтверждают результаты статистического анализа базы данных палеонапряжённости, указывающие на существование обратной корреляции между частотой инверсий и напряжённостью геомагнитного поля [5]. Так большинство имеющихся для интервала C34n определений отвечают средним значениям виртуального дипольного момента (VDM)  $4.8 \times 10^{22} \text{ А} \cdot \text{м}^2$ . При этом начало эпохи сравнительно высокого геомагнитного поля, согласно результатам этого анализа, намечается незадолго до начала суперхрона, около 135 млн лет назад. Предшествующий ему юрско-раннемеловой (135–200 млн лет) интервал характеризуется частыми

<sup>1</sup>Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской Академии наук, Новосибирск, Россия

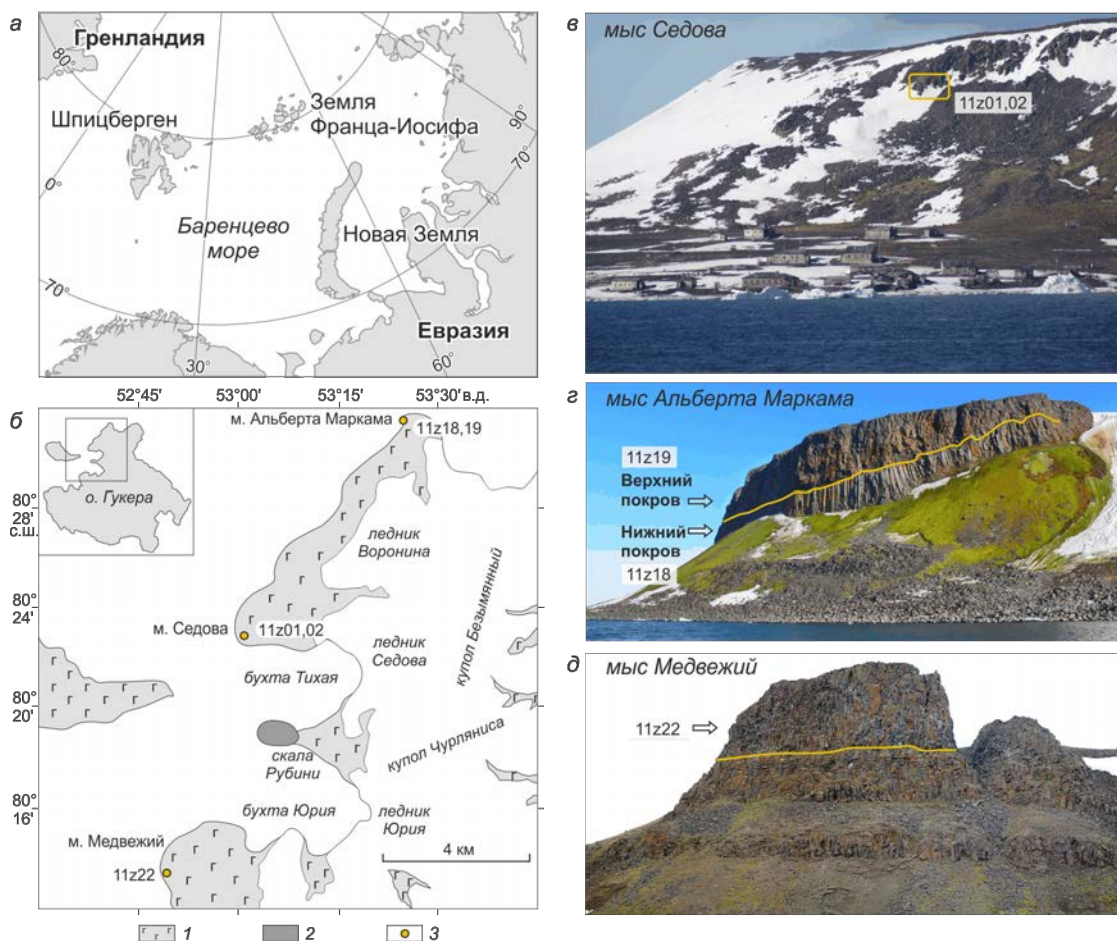
<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

\*E-mail: abashev@ipgg.sbras.ru

инверсиями, а соответствующие этому интервалу значения VDM сравнительно ниже, в среднем  $2.5 \times 10^{22}$  А·м<sup>2</sup>. Однако, в ряде работ ([6, 7] и др.) приводятся фактические данные, отвергающие такую корреляцию VDM с частотой инверсий, и свидетельствующие о наличии интервалов экстремально слабого геомагнитного поля во время С34n. В рамках поставленной проблемы необходима аккумуляция всесторонне обоснованных данных по палеонапряжённости для юрско-мелового интервала. Наиболее подходящим источником такой информации являются мощные вулканические разрезы крупных магматических провинций. Непосредственным объектом нашего исследования стали базальтовые покровы архипелага Земля Франца-Иосифа (ЗФИ), которые представляют один из ареалов Баренцево-морской части крупной магматической

провинции Высокоширотной Арктики (HALIP). До настоящего времени базальты ЗФИ были детально изучены на предмет сохранности и ориентировки вектора естественной остаточной намагниченности [8, 9]. С использованием геохронологических данных доказано, что формирование базальтов и фиксация установленного в них палеомагнитного сигнала приходится на конец баррема—апт (125 млн лет назад).

В данной работе мы представляем первые для архипелага ЗФИ результаты изучения палеонапряжённости на примере серии мощных базальтовых покровов, бронирующих остров Гукера. В частности, представляемые в анализе базальты опробованы в бухте Тихая восточнее м. Седова, а также в обнажениях на м. Альберта Маркама и м. Медвежий (рис. 1).



**Рис. 1.** Геологическое строение северной части о. Гукера, район бухты Тихой. а — схема расположения архипелага Земля Франца-Иосифа; б — схема геологического строения о. Гукера: 1 — раннемеловые базальты и долериты нерасчлененные; 2 — штук скалы Рубини; 3 — точки палеомагнитного опробования; в — общий вид клифа бухты Тихой с указанием местоположения обнажения 11z01, 02; г — фото разреза на мысе Альберта Маркама с указанием местоположения обнажения 11z18, 19; д — фото разреза на мысе Медвежий с указанием местоположения обнажения 11z22.

Носителем первичной намагниченности в исследуемых базальтах является титаномagnetит с температурами Кюри  $\sim 250\text{--}300^\circ\text{C}$  [8, 9]. В этом же диапазоне происходит потеря основной части намагниченности в ходе ступенчатой температурной чистки. При нагреве не выше  $300^\circ\text{C}$  существенных минералогических изменений в образцах практически не происходит. Анализ гистерезисных параметров свидетельствует о преобладании псевдооднодоменных, реже ещё более мелких — однодоменных частиц [8, 9]. В целом петромагнитные характеристики, магнитная минералогия, результаты изучения компонентного состава намагниченности указывают на потенциальную перспективность для определения абсолютной величины древнего геомагнитного поля.

Определение абсолютных значений палеонапряжённости  $B_{\text{anc}}$  проводилось методом Телье-Коэ с выполнением процедуры контрольных точек (check-points) [10]. Для большинства исследованных образцов диаграммы Арай-Нагата (АН) и Зийдвервельда имеют общие характерные черты (рис. 2). Как правило, на них прослеживаются две компоненты. На первых шагах чистки, уже при  $100\text{--}120^\circ\text{C}$ , разрушается хаотически ориентированная компонента, имеющая вязкую природу. Преимущественно при нагреве от  $\sim 160^\circ\text{C}$  и вплоть до полной потери природной намагниченности разрушается единственная регулярная характеристическая компонента. На АН-диаграммах позиции check-points совпадают или близки к первичным точкам, что указывает на отсутствие химических изменений в процессе нагрева. Также наблюдается чёткий прямолинейный участок (fit-интервал), по которому делалась оценка  $B_{\text{anc}}$  и рассчитывались связанные с ней параметры (рис. 2). Подавляющее большинство полученных определений  $B_{\text{anc}}$  отвечают необходимым критериям надёжности [11]. Эти оценки, в частности, подтверждают результаты экспериментов методом Вилсона—Буракова. Соответствующие графики демонстрируют подобие кривых NRM и TRM\* (см. рис. 2), а полученные в итоге значения  $B_{\text{anc}}^*$  близки к оценкам  $B_{\text{anc}}$  методом Телье-Коэ.

Таким образом, удалось всесторонне обосновать и подтвердить 38 определений  $B_{\text{anc}}$ , полученных методом Телье-Коэ, которые использованы в дальнейшем анализе. В расчётах среднего в точке отбора значения  $B_{\text{anc}}$  участвует не менее 8 определений (табл. 1). Для расчёта VDM использована стандартная формула [12]:

$$\text{VDM} = 0.5 \times B_{\text{anc}} r^3 \sqrt{1 + 3\cos^2 I} \times 10^7,$$

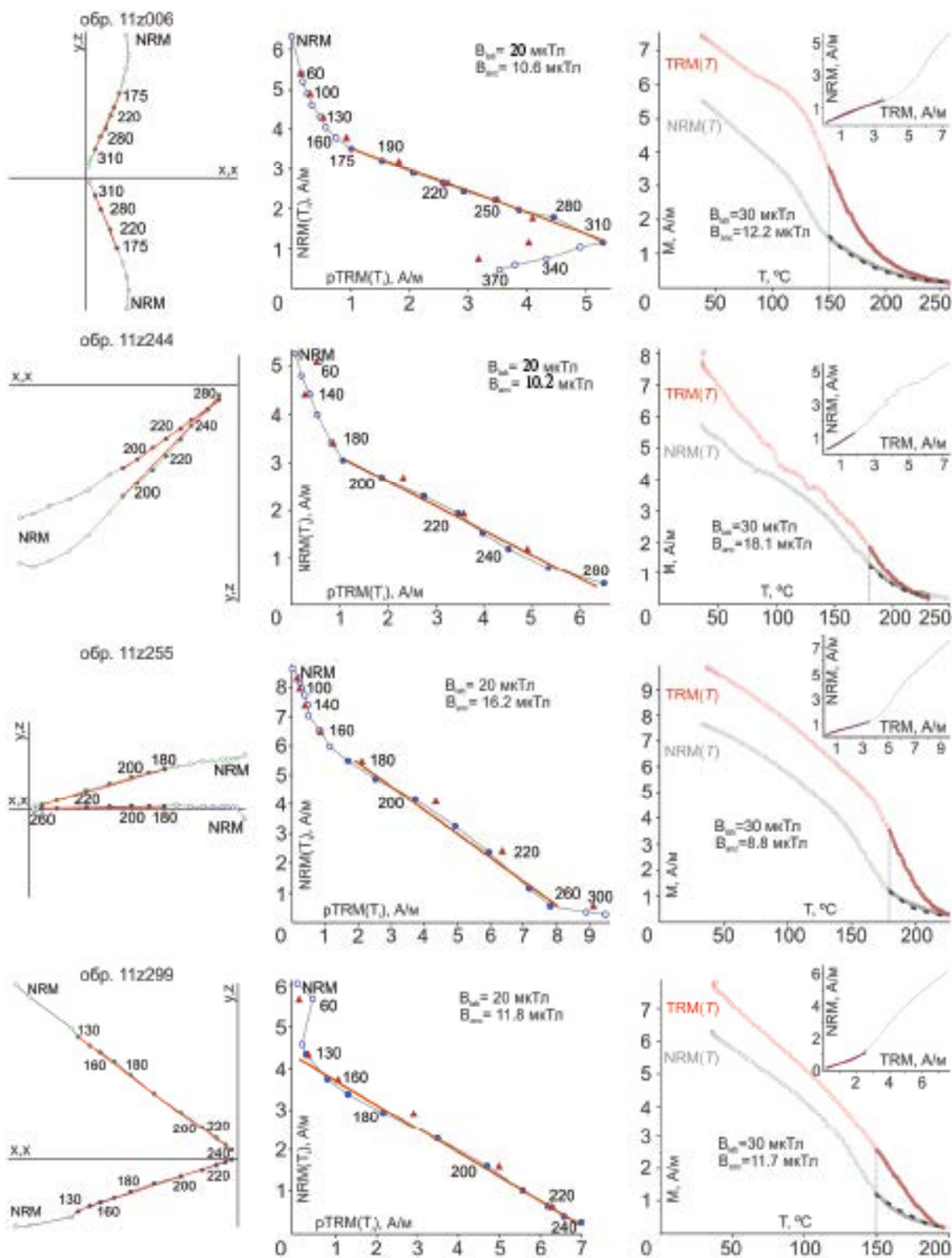
где  $B_{\text{anc}}$  — среднее в точке отбора значение палеонапряжённости,  $r$  — радиус Земли,  $I$  — значение

магнитного наклона (использовано значение  $75.6^\circ$ , которое получено в результате осреднения всего массива палеомагнитных данных по базальтам ЗФИ [9]).

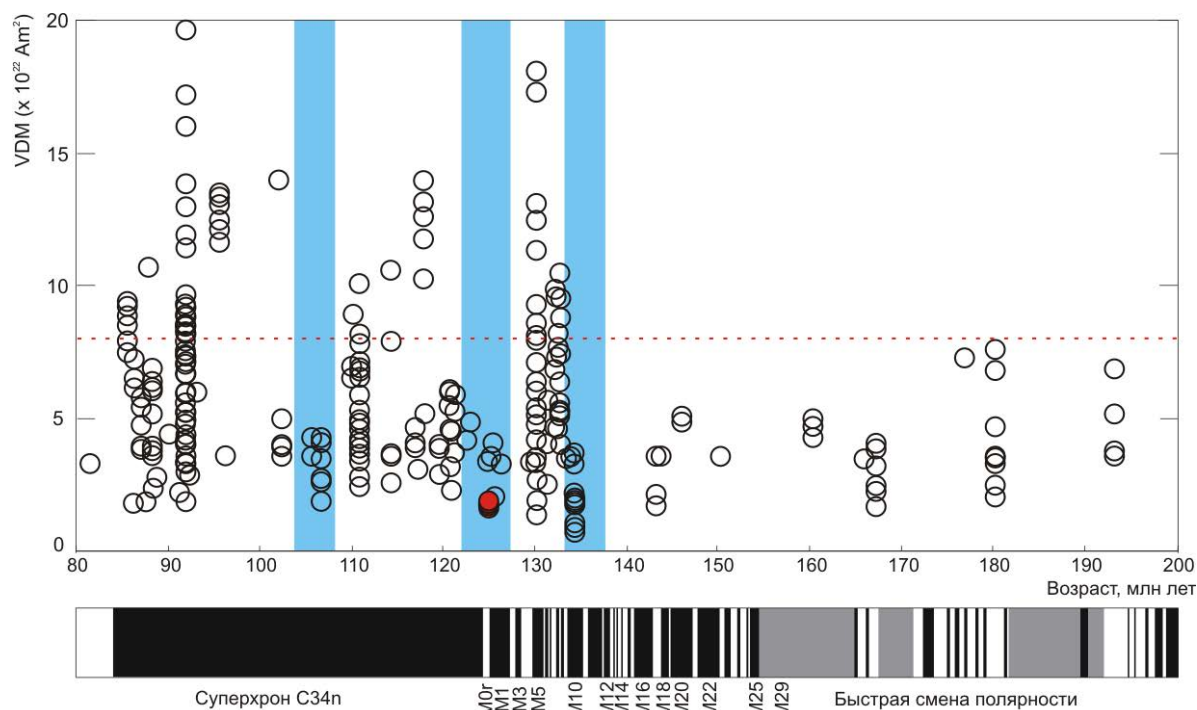
Полученные в итоге данные свидетельствуют, что на рубеже баррема-апта величина геомагнитного поля была минимум в 4 раза ниже современной. Рассчитанные средние в точках отбора значения VDM с учётом стандартного отклонения изменяются в пределах  $(1.3\text{--}2.2) \cdot 10^{22} \text{ А}\cdot\text{м}^2$  (табл. 1). Эти аномально низкие значения палеонапряжённости подтверждают оценки величины VDM для рубежа  $\sim 125$  млн лет назад, представленные ранее в [6]. Соответственно нет оснований отрицать реальность эпизодов резкого падения напряжённости в эпохи преобладающего безинверсионного режима геомагнитного поля. Согласно анализу данных мировой базы палеонапряжённости единичные низкие VDM встречаются на всём интервале преобладающего высокого поля ( $135\text{--}84$  млн лет), связанного с меловым суперхроном (рис. 3). В рамках стандартных теоретических моделей такие изменения абсолютного значения величины геомагнитного поля носят случайный характер и объясняются ультракраткими событиями, не связанными со сколь-нибудь значимыми изменениями в режиме работы геодинамо и общей термодинамике внутренних оболочек Земли. Однако, набор имеющихся данных позволяет наметить во время C34n минимум два достаточно продолжительных интервала  $\sim 127\text{--}122$  и  $108\text{--}104$  млн лет, когда значения обычно высокого VDM отсутствуют, а средние значения снижаются до  $\sim 2 \cdot 10^{22} \text{ А}\cdot\text{м}^2$ . Третий чётко выраженный минимум приходится на  $\sim 135$  млн лет и завершает юрско-раннемеловую эпоху низкого геомагнитного поля (рис. 3).

Анализ имеющихся данных о возрасте плюмовых проявлений [14] даёт основание вполне уверенно сопоставлять указанные эпизоды падения абсолютной величины напряжённости с пиками плюмового магматизма. Так согласно многочисленным U–Pb и  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  определениям основной объём траппов провинции Парана-Этендека сформированы в интервале  $135\text{--}132$  млн лет [14]. Один из крупнейших в истории Земли максимумов плюмового магматизма приходится на  $\sim 125$  млн лет [4, 15–17]. В частности, трапповые комплексы этого возраста широко представлены в составе провинции Онтонг-Ява (плато Манихики  $\sim 127\text{--}126$  млн лет). Вторая вспышка магматизма в пределах этой же провинции, согласно геохронологическим оценкам, приходится на уровень  $\sim 95$  млн лет (плато Хикиранги





**Рис. 2.** Типичные графики по результатам палеомагнитных экспериментов для раннемеловых базальтов ЗФИ, слева—направо: ортогональная диаграмма Зийдверельда (в координатах образца) по результатам ступенчатого термо-размагничивания; диаграммы Арай—Нагата по оценке палеонапряжённости  $B_{anc}$  методом Телье—Коэ (заполненные и полые точки — экспериментальные значения, вошедшие и не вошедшие в интервал аппроксимации, красная прямая — линия тренда, треугольники — check-points); термомагнитные кривые NRM, TRM и TRM\* и график зависимости NRM и TRM для оценки палеонапряжённости  $B_{anc}^*$  методом Вилсона—Буракова.



**Рис. 3.** Сопоставление полученных значений VDM (красные круги) (см. табл. 1) с имеющимися определениями (белые круги) для периода 80–200 млн лет по [5]. Внизу временная шкала геомагнитной полярности по [13], чёрный цвет соответствует интервалам прямой, белый – обратной, серый – смешанной (частые инверсии вне масштаба) полярности. Красной пунктирной линией показано современное значение VDM, голубыми вертикальными полосами выделены интервалы ультранизких значений VDM.

**Таблица 1.** Средние значения Banc методом Телье-Коэ и соответствующие VDM

Точка отбора	Палеоинтенсивность					VDM $\times 10^{22} \text{Am}^2$		
	N/n	Banc $\mu\text{T}$	Banc St.err. $\mu\text{T}$	Banc St.err. %	Banc St.dev. $\mu\text{T}$	VDM	VDM St.err	VDM St.dev
11z01,02	12/12	11.3	0.6	5.4	2.1	1.6	0.1	0.3
11z18	8/8	12.3	0.8	6.7	2.3	1.7	0.1	0.3
11z19	8/8	12.2	1.1	8.7	3.0	1.7	0.2	0.4
11z22	10/10	13.2	0.7	5.5	2.3	1.9	0.1	0.3

Примечание. n/N – количество использованных в статистике к общему количеству изученных образцов; St.err – стандартная ошибка; St.dev – стандартное отклонение.

~110–93 млн лет; плато Онтонг-Ява ~96 млн лет) [14]. Приблизительно в это же время ~128–90 млн лет сформирован основной объём провинции Кергулен [14]. Наконец, главный максимум магматизма HALIP, согласно имеющимся оценкам, соответствует ~125–120 млн лет, а второй, вероятно значительно меньший по объёму, пик – интервалу ~96–92 млн лет [9, 18, 19]. С наиболее поздним эпизодом падения напряжённости можно также связать формирование

значительной части Карибской крупной изверженной провинции (~97–70 млн лет) и провинции Мадагаскар (~90 млн лет) [14].

Представления о корреляционной связи между напряжённостью геомагнитного поля, частотой инверсий, рядом других глобальных индикаторов и формированием мантийных плюмов не новы [1, 2, 17, 20]. Модели, объясняющие эту зависимость, предполагают перегрев внешнего ядра из-за того, что кондуктивный

перенос в мантии не справляется с отводом поступающего тепла. Это приводит к гиперактивному режиму работы геодинамо, что, в том числе, выражается в увеличении частоты инверсий. При этом сам механизм смены полярности предполагает снижение напряжённости во время инверсионного перехода. Таким состоянием можно описать весь юрско-раннемеловой (135–200 млн лет) интервал низкого поля (см рис. 3). Достижение критических температур на границе ядро–мантия, как мы полагаем, на уровне 135 млн лет вызывает возникновение, отрыв и постепенное “всплытие” перегретого мантийного вещества в виде плюма, который таким образом отводит излишки тепла. Это практически сразу вызывает отклик на режиме течений во внешнем ядре и приводит к постепенной релаксации в работе геодинамо. Магнитное поле “успокаивается” и частота инверсий постепенно снижается, вплоть до их длительного отсутствия, что соответствует суперхрону. При этом надо учесть, что магнитное поле реагирует на отвод тепла сразу при зарождении плюма, тогда как его фиксируемые поверхностные проявления, могут заметно (до ~10 и более млн лет) запаздывать [2, 20]. Это время необходимо на поднятие плюма, подготовку холодной литосферы и подлитосферного очага к активной фазе магматизма с образованием крупной изверженной провинции. В таком случае, намеченные эпизоды снижения величины палеонапряжённости непосредственно перед и во время C34n на уровнях ~135, 125 и 105 млн лет назад можно интерпретировать как отражение финального сброса отведённой от ядра тепловой энергии и, соответственно, коррелировать с пиками плюмового магматизма при формировании крупных изверженных провинций, в том числе HALIP.

#### ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование проведено при финансовой поддержке Российского научного фонда: проект № 23-77-01065 (результаты экспериментов по изучению палеонапряжённости по траппам ЗФИ и регионального анализа полученных данных), проект № 24-17-00057 (результаты, связанные с анализом геологического строения и геодинамическими событиями в Высокоширотной Арктике), а также Минобрнауки России грант № FSUS-2020-0039 (результаты, связанные с анализом зависимости напряжённости геомагнитного поля и эволюцией мантийных плюмов). Тематика исследования скоординирована с программой фундаментальных научных исследований РАН FWZZ-2022-0001.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Larson R.L., Olson P.* Mantle plumes control magnetic reversal frequency // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1991. V. 107. P. 437–447. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(91\)90091-u](https://doi.org/10.1016/0012-821x(91)90091-u)
2. *Courtillot V., Olson P.* Mantle plumes link magnetic superchrons to Phanerozoic mass depletion events // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2007. V. 260. P. 495–504. <http://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.06.003>
3. *Biggin A.J., Steinberger B., Aubert J., et al.* Possible links between long-term geomagnetic variations and whole-mantle convection processes // *Nature Geosciences.* 2012. V. 5(8). P. 526–533. <https://doi.org/10.1038/NGEO1521>
4. *Добрецов Н.Л.* Глобальная геодинамическая эволюция Земли и глобальные геодинамические модели // *Геология и геофизика.* 2010. Т. 51 (6). С. 761–784.
5. *Kulakov E.V., Sprain C.J., Doubrovine P.V., et al.* Analysis of an Updated Paleointensity Database (QPI-PINT) for 65–200 Ma: Implications for the Long-Term History of Dipole Moment Through the Mesozoic // *JGR Solid Earth.* 2019. V. 124. P. 9999–10022. <https://doi.org/10.1029/2018JB017287>
6. *Di Chiara, A., Tauxe, L., Staudigel, H., et al.* Earth’s magnetic field strength and the Cretaceous Normal Superchron: New data from Costa Rica // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems.* 2021. V. 22(4). e2020GC009605. <https://doi.org/10.1029/2020GC009605>
7. *Bobrovnikova E.M., Lhuillier F., Shcherbakov V.P., et al.* High-Latitude Paleointensities During the Cretaceous Normal Superchron from the Okhotsk–Chukotka Volcanic Belt // *JGR Solid Earth.* 2022. V. 127. e2021JB023551. <https://doi.org/10.1029/2021JB023551>
8. *Абашев В.В., Метелкин Д.В., Михальцов Н.Э. и др.* Палеомагнетизм траппов архипелага Земля Франца-Иосифа // *Геология и геофизика.* 2018. Т. 59. №9. С. 1445–1468. <https://doi.org/10.15372/GiG20180910>
9. *Метелкин Д.В., Абашев В.В., Верниковский В.А. и др.* Палеомагнетизм архипелага Земля Франца-Иосифа: приложение к мезозойской тектонике Баренцево-моровской континентальной окраине // *Геология и геофизика.* 2022. Т. 63. № 4. С. 410–439. <https://doi.org/10.15372/GiG2021175>
10. *Prévot M., Mankinen E.A., Coe R.S., Grommé C.S.* The Steens Mountain (Oregon) geomagnetic polarity transition: 2. Field intensity variations and discussion of reversal models // *J. Geophys. Res. B: Solid Earth.* 1985. V. 90 (B12). P. 10417–10448. <https://doi.org/10.1029/JB090iB12p10417>
11. *Shcherbakova V.V., Bakmutov V.G., Thallner D., et al.* Ultra-low palaeointensities from East European Craton, Ukraine support a globally anomalous palae-

- omagnetic field in the Ediacaran // *Geophysical Journal International*. 2020. V. 220. Iss. 3. P. 1928–1946. <https://doi.org/10.1093/gji/ggz566>
12. *Merrill R.T., McElhinny M.W., McFadden P.L.* The Magnetic Field of the Earth: Paleomagnetism, the Core, and the Deep Mantle. Academic Press. San Diego, Calif. 1996. 531 p. <https://doi.org/10.1063/1.881919>
  13. *Walker J.D., Geissman J.W., Bowring S.A., et al.* The Geological Society of America Geologic Time Scale // *GSA Bulletin*. 2013. V. 125. №3/4. P. 259–272. <https://doi.org/10.1130/B30712.1>
  14. *Jiang Q., Jourdan F., Olierook H.K.H., Merle R.E.* An appraisal of the ages of Phanerozoic large igneous provinces // *Earth-Science Reviews*. 2023. V. 237. P. 104314. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104314>
  15. *Ernst R.E.* Large Igneous Provinces. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2014. 653 p.
  16. *Диденко А.Н., Ханчук А.И.* Смена геодинамических обстановок в зоне перехода Тихий океан — Евразия в конце раннего мела // *ДАН*. 2019. Т. 487. № 4. С. 405–408. <https://doi.org/10.31857/S0869-56524874405-408>
  17. *Добрецов Н.Л., Метелкин Д.В., Василевский А.Н.* Характерные свойства магнитного и гравитационного полей Земли, взаимосвязанные с глобальной и региональной тектоникой // *Геология и геофизика*. 2021. Т. 62. № 1. С. 10–30. <https://doi.org/10.15372GiG2020181>
  18. *Абашев В.В., Метелкин Д.В., Верниковский В.А., и др.* Раннемеловой возраст базальтов архипелага Земля Франца-Иосифа: соответствие новых  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  и палеомагнитных данных // *ДАН*. 2020. Т. 493. №1. С. 16–20. <https://doi.org/10.31857/S2686739720070038>
  19. *Corfu F., Polteau S., Planke S., et al.* U-Pb geochronology of Cretaceous magmatism on Svalbard and Franz Josef Land, Barents Sea Large Igneous Province // *Geol. Mag.* 2013. V. 150 (6). P. 1127–1135. <https://doi.org/10.1017/S0016756813000162>
  20. *Диденко А.Н.* О возможной причине квазипериодических колебаний частоты геомагнитных инверсий и величины  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  в морских карбонатных породах в фанерозое // *Геология и геофизика*. 2011. Т. 52. № 12. С. 1945–1956.

## THE EARLY CRETACEOUS ABSOLUTE GEOMAGNETIC PALEOINTENSITY BASED ON RESULTS FOR TRAPS OF THE FRANZ JOSEF LAND ARCHIPELAGO

**V.V. Abashev<sup>a,b,#</sup>**, Corresponding Member of the RAS **D.V. Metelkin<sup>a,b</sup>**, **A.A. Eliseev<sup>b,a</sup>**,  
Academician of the RAS **V.A. Vernikovskiy<sup>a,b</sup>**, **N.E. Mikhaltsov<sup>a,b</sup>**, **E.V. Vinogradov<sup>b,a</sup>**

<sup>a</sup>*Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch  
of the Russian Academy of Science, Novosibirsk, Russian Federation*

<sup>b</sup>*Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation*

<sup>#</sup>*E-mail: abashev@ipgg.sbras.ru*

Data on the absolute value of the geomagnetic field intensity at the beginning of the Cretaceous Normal Superchron (C34n) was obtained from basalts of Hooker Island of the Franz Josef Land archipelago (FJL). These basalts are considered as one of the manifestations of the High Arctic Large Igneous Province. The record of the ancient geomagnetic field in the studied Early Cretaceous basalts was preserved well due to the presence of pseudo-single domain grains of primary magmatic titanomagnetite. The paleointensity, obtained by the Thellier–Coe method, satisfies the generally accepted reliability criteria, taking into consideration other necessary evidence. This information indicates that 125 Ma, during the formation of the FJL traps, the intensity of the geomagnetic field was four times lower than today. Our estimates show that the mean value of the virtual dipole moment was  $1.7 \cdot 10^{22} \text{ Am}^2$ . These results support the views about the low paleointensity at the Barremian–Aptian boundary and indicate a correlation between the intensity of the geomagnetic field, the frequency of reversals, and the formation of mantle plumes.

**Keywords:** paleomagnetism, paleointensity, Cretaceous superchron C34n, Thellier–Coe method, traps, Franz Josef Land archipelago, large igneous provinces